

Электродинамика, микроволновая техника, антенны

Статья посвящена 80-летию факультета радиотехники и телекоммуникаций

УДК 621.396.67

Научная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2025-28-3-42-56>

Широкополосные отражательные антенные решетки диапазона СВЧ

Л. М. Любина[✉], С. В. Балландович, Г. А. Костиков, Ю. Г. Антонов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

[✉] lmlyubina@etu.ru

Аннотация

Введение. Разработка широкополосных отражательных антенных решеток (ОАР) для диапазона СВЧ остается ключевой задачей в контексте растущих требований к телекоммуникационным системам, включая сети 5G/6G и спутниковую связь. Несмотря на значительное количество исследований, посвященных методам расширения полосы рабочих частот, представляет интерес анализ данных экспериментальных исследований разработанных макетов ОАР, подтверждающих эффективность рассмотренных подходов.

Цель работы. Систематизация подходов к проектированию, позволяющих расширить полосу рабочих частот ОАР. Основное внимание уделено экспериментальной проверке рассматриваемых подходов – использованию многослойных структур, пространственного разнесения и геометрической оптимизации элементов – для уточнения их практической применимости.

Материалы и методы. Работа объединяет анализ существующих методик (численное моделирование FI, FEM, электродинамический расчет на основе ячейки Флоке, метод моментов в спектральной области) с экспериментальными исследованиями ОАР на основе различного типа элементов. Измерения проведены для печатных и цельнометаллических ОАР с применением сканера ближнего поля Antest V3-1 и векторного анализатора цепей Agilent N5230A PNA-L. Алгоритмы минимизации фазовых ошибок адаптированы для работы в расширенном частотном диапазоне.

Результаты. Экспериментально подтверждено расширение полосы рабочих частот по уровню снижения коэффициента усиления (КУ) на 3 дБ от максимального значения до 40 % для многослойных печатных ОАР и 19.62 % для угловых конструкций. Оптимизация геометрии элементов на основе гантельных крестообразных структур обеспечивает относительную полосу 28 % при снижении КУ на 0.5 дБ. Цельнометаллические щелевые ОАР демонстрируют устойчивость к экстремальным условиям, но требуют учета на этапе проектирования возможности возбуждения мод плоскопараллельного волновода, существенно влияющих на их характеристики.

Заключение. Представлены рекомендации по выбору геометрии, конструкции и технологии изготовления различных ОАР на основании опыта теоретических и экспериментальных исследований, проводимых на кафедре теоретических основ радиотехники СПбГЭТУ "ЛЭТИ" в 2010–2025 гг. Приведенные данные формируют основу для проектирования антенн, соответствующих требованиям высокоскоростных телекоммуникационных систем, и указывают направления для дальнейших исследований, включая миниатюризацию, повышение прочности и устойчивости конструкций.

Ключевые слова: СВЧ, отражательные антенные решетки, полоса рабочих частот, коэффициент усиления, ячейка Флоке

Для цитирования: Широкополосные отражательные антенные решетки диапазона СВЧ / Л. М. Любина, С. В. Балландович, Г. А. Костиков, Ю. Г. Антонов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 3. С. 42–56.
doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-3-42-56

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Авторы статьи выражают благодарность сотрудникам кафедры электронных приборов и устройств СПбГЭТУ "ЛЭТИ" Староверову Николаю Евгеньевичу и Ларионову Ивану Алексеевичу за рентгеновские изображения конструкций, демонстрируемых в данной статье (изображения на рис. 1, б и рис. 3, а).

Статья поступила в редакцию 14.03.2025; принята к публикации после рецензирования 21.04.2025; опубликована онлайн 30.06.2025



Wideband Reflectarray Antennas in the Microwave Range

Liubov M. Liubina[✉], Svyatoslav V. Ballandovich,
Grigory A. Kostikov, Yuriy G. Antonov

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

[✉] lmyubina@etu.ru

Abstract

Introduction. The development of broadband reflectarray antennas for the microwave band remains a key challenge in the context of stricter requirements imposed on telecommunications systems, including 5G/6G networks and satellite communications. Despite a significant number of studies devoted to methods of extending the operating frequency band, it is of interest to analyze data from experimental studies of the developed reflectarrays, confirming the effectiveness of the considered approaches.

Aim. Generalization of the design approaches used to extend the operating frequency band of reflectarrays. The main attention is paid to the experimental verification of the considered approaches, i.e., the use of multilayer structures and spatial diversity and geometric optimization of elements, with the purpose of clarifying their practical applicability.

Materials and methods. An analysis of existing techniques (numerical modeling of FI, FM, electrodynamic calculation based on a Floquet cell) and the results of original experimental research in this field was conducted. Measurements were carried out on printed, all-metal, and conformal reflectarrays using an Antast B3-1 near-field scanner and an Agilent N5230A PNA-L vector circuit analyzer. The phase error minimization algorithms were adapted to work in the extended frequency range.

Results. The study experimentally confirmed the extension of the operating frequency band in terms of the 3 dB criterion from the maximum value of the gain to 40 % for multilayer printed circuit boards and 19.6 % for corner structures. Optimization of the geometry of the elements based on dumbbell cross-shaped structures provides a relative band of 28 % with a decrease in gain by 0.5 dB. All-metal slit tubes demonstrate resistance to extreme conditions, although requiring consideration of the possibility of excitation of plane-parallel waveguide modes at the design stage, which have a significant impact on their characteristics.

Conclusion. Recommendations on the choice of geometry, design, and manufacturing technology of various reflectarrays based on the experience of theoretical and experimental research conducted at the Department of Theoretical Foundations of Radio Engineering of Saint Petersburg Electrotechnical University in 2010–2025 are presented. These data form the basis for designing antenna arrays that meet the requirements of high-speed telecommunications systems and indicate areas for further research, including miniaturization and increased structural stability.

Keywords: microwave, reflectarray antennas, operating frequency band, Gain, Floquet cell

For citation: Liubina L. M., Ballandovich S. V., Kostikov G. A., Antonov Yu. G. Wideband Reflectarray Antennas in the Microwave Range. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2025, vol. 28, no. 3, pp. 42–56. doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-3-42-56

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Acknowledgements. The authors of the article would like to thank Nikolay E. Staroverov and Ivan A. Larionov, employees of the Department of Electronic Devices and Systems at Saint Petersburg Electrotechnical University, for the X-ray images of the structures shown in this article (Fig. 1, б and Fig. 3, а).

Submitted 14.03.2025; accepted 21.04.2025; published online 30.06.2025

Введение. Современные телекоммуникационные системы, включая спутниковую связь, сети пятого и шестого поколения, предъявляют все более высокие требования и к антенным технологиям. В условиях растущей потребности в высоких скоростях передачи данных (свыше 100 Гбит/с) и работе на частотах выше 60 ГГц (например, Wi-Fi IEEE 802.11ay) созда-

ние эффективных и технологичных антенных решеток становится одной из ключевых задач в процессе разработки радиосистем [1–3]. Отражательные антенные решетки (ОАР), благодаря возможности формирования диаграммы направленности специальной формы, а также своим массогабаритным характеристикам, занимают важное место среди современных ан-

тенных систем [4]. Это привело и к разнообразию технологий изготовления ОАР: печатные платы (PCB/MMIC) для компактных и многодиапазонных решений [5]; фрезеровка и лазерная резка для цельнометаллических щелевых антенн [6, 7]; фото/электронно-лучевая литография для управления фазой и амплитудой [8, 9]; 3D-печать (SLM, DMLS) для сложных форм и снижения массы [10]. Стоит отметить, что в последние годы для задач синтеза ОАР стали использоваться и технологии искусственного интеллекта, такие, как глубокое обучение и генетические алгоритмы. Например, в [11] нейросетевые модели используются для предсказания диаграмм направленности, а в [12] за счет применения нейросети удалось синтезировать отражательную метаповерхность с эффективностью 36 % и относительной полосой рабочих частот 7 %.

Несмотря на активное внедрение численных методов в процесс синтеза ОАР, аналитические модели, основанные на анализе элементов в составе ячейки Флоке с решением интегральных уравнений относительно неизвестных поверхностных токов на элементах в пространственной или спектральной области, а также метод конечно-бесконечных решеток остаются базовыми фундаментальными инструментами для анализа и синтеза ОАР [13]. Эти методы способствуют более глубокому пониманию физических процессов, происходящих в антенных структурах, и позволяют получать первичные оценки характеристик для решения проблемы расширения полосы рабочих частот ОАР, особенно актуальной в условиях современных требований по миниатюризации и интеграции с различными современными радиосистемами.

В данной статье представлены результаты разработки, синтеза и экспериментальных исследований различных типов ОАР. Особое внимание уделено разработке и анализу результатов экспериментального исследования антенн для диапазона СВЧ, расширению полосы рабочих частот и минимизации фазовых ошибок. Исследования представленных макетов (если не указано иное) производились в ЦКП "БЭК" СПбГЭТУ "ЛЭТИ" с использованием сканера ближнего поля Antest V3-1 и ВАЦ Agilent N5230A PNA-L.

Расширение полосы рабочих частот за счет применения многослойных элементов.

Наиболее распространенное направление расширения полосы рабочих частот как антенных решеток с внутренним питанием, так и с квазиоптическим, рассматриваемых в данной статье, – использование многослойных элементов при синтезе ОАР.

За счет увеличения количества электромагнитно-связанных элементов в пределах элементарной ячейки обеспечивается расширенный и монотонный диапазон регулировки фазы коэффициента отражения. Это позволяет компенсировать фазовые ошибки в более широком диапазоне частот, сохраняя требуемое амплитудно-фазовое распределение в раскрыве антенны. Каждый новый слой может увеличивать общий диапазон регулировки фазы (в пределе – до 360° на слой). При этом целесообразно использовать элементы субрезонансной длины ($\leq 0.5\lambda$) для снижения зависимости характеристик от частоты. Такие решения можно считать частным случаем метаматериальных отражательных поверхностей [14, 15]. Для демонстрации предельных характеристик на рис. 1 приводятся зависимости регулировки фазы для дисковых однослойных элементов, полученные авторами как посредством моделирования FIMетодом, так и экспериментально. На лавсановом листе средствами фотолитографии были изготовлены дисковые отражательные элементы, разделенные на несколько групп. Каждая группа состояла из семи элементов определенного радиуса, расположенных в узлах гексагональной сетки (рис. 1, б). В качестве диэлектрической подложки использовался вспененный поливинилхлорид (ПВХ, $\epsilon = 1.33$) толщиной 1 мм. Фаза отраженного поля определялась на основе измерения коэффициента отражения на входе рупора, в раскрыв которого помещался описанный стек (рис. 1, в). Результаты измерений на нескольких частотах и теоретические данные на частоте 13.3 ГГц показаны на рис. 1, а. Графики хорошо совпадают по форме, но наблюдается расхождение по частоте. Последнее объясняется тем, что при моделировании не учитывалось наличие пленки (лавсана).

Расширить диапазон изменения фазы отраженного поля можно за счет наращивания

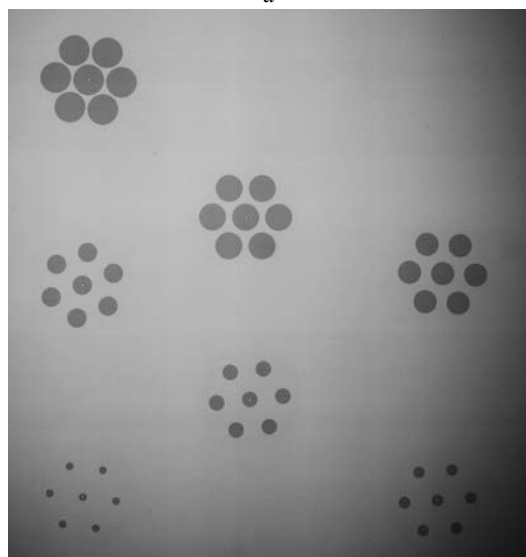
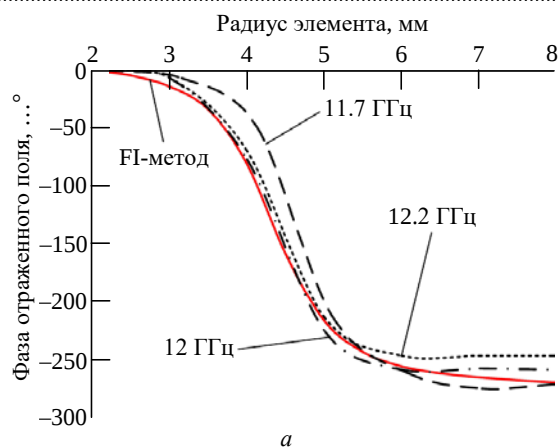


Рис. 1. Измерение фазы коэффициента отражения от дискового элемента: *а* – измеренные зависимости фазы коэффициента отражения от однослойного элемента на различных частотах в сравнении с результатом численного моделирования; *б* – вид исследуемых элементов; *в* – фрагмент экспериментальной установки

Fig. 1. Measurement of the phase of the reflection coefficient from a disk element: *a* – measured dependences of the phase of the reflection coefficient on a single-layer element at different frequencies in comparison with the numerical data; *б* – studied elements; *в* – a fragment of the experimental setup

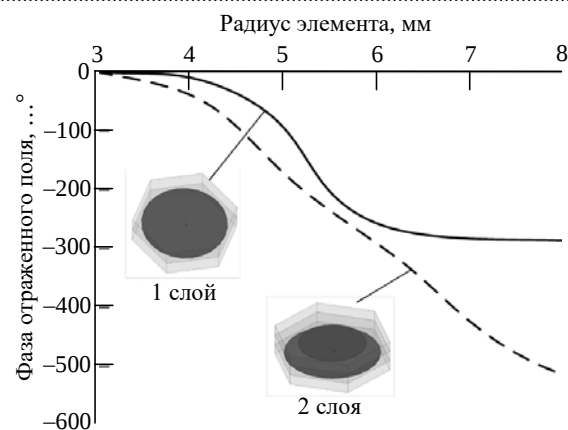


Рис. 2. Зависимость фазы коэффициента отражения от однослойного и двухслойного дисковых элементов в пределах ячейки Флоке

Fig. 2. Reflection coefficient phase dependence on the single-layer and double-layer disk elements radius within the Floquet cell

количества слоев структуры. Так на рис. 2 показаны зависимости фазы коэффициента отражения от радиуса элемента для однослойного и двухслойного дисковых элементов, выполненных на основе подложки из ПВХ толщиной 2 мм, в пределах ячейки Флоке при шаге гексагональной сетки 17 мм. Видно, что за счет введения дополнительного слоя удалось увеличить диапазон с 300 до 500°.

Офсетная печатная ОАР (ПОАР) на основе элементов, изображенных на рис. 2, размером раскрытия $13\lambda \times 13\lambda$ и отношением расстояния до облучателя к его диаметру $F/D = 1$ представлена на рис. 3, *а*. В данном случае угол отклонения главного лепестка диаграммы направленности равен 45°. Взаимное расположение облучателя и рефлектора и характер расположения отражательных элементов для однослойной антенны также показаны на рис. 3, *а*. Коэффициент направленного действия (КНД) однослойной структуры составил 25.2 дБ, коэффициент использования поверхности (КИП) изготовленного образца примерно равен 16 %.

Переход на двухслойную структуру (рис. 2 – штриховая линия) позволяет значительно улучшить характеристики антенны. При тех же геометрических параметрах (размеры раскрытия, отношение F/D) коэффициент усиления (КУ) вырос на 2.5 дБ – до 28 дБ, полоса рабочих частот возросла до 16.5 % по уровню 3 дБ (против 9.7 % у однослойной ОАР). Коэффициент использования поверхности вырос с 16 до

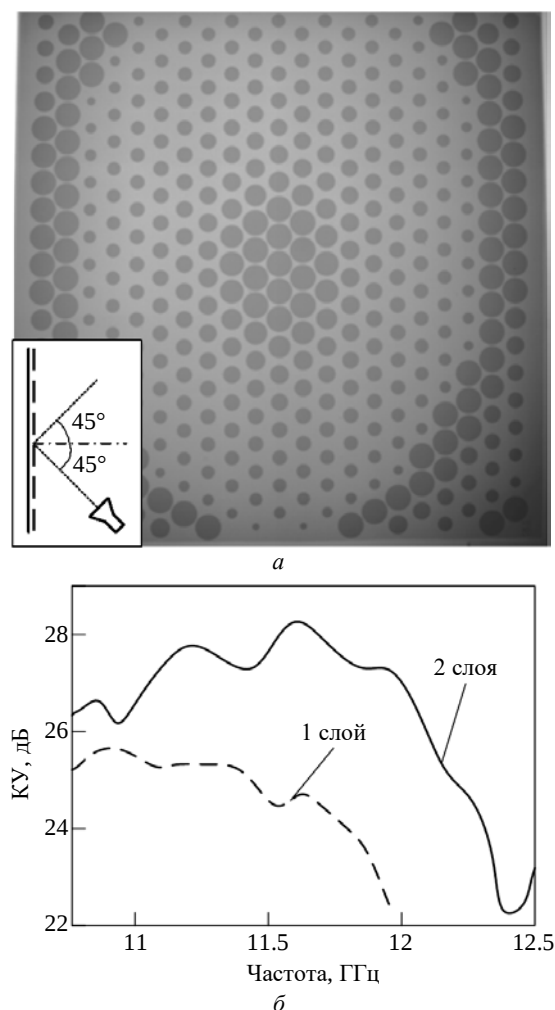


Рис. 3. Измерение ПОАР: а – вид однослойной ПОАР на основе дискового элемента; б – измеренные частотные зависимости КУ однослойной и двухслойной ПОАР

Fig. 3. PCB based reflectarray measurement: а – single-layer reflectarray based on a disk element; б – measured gain frequency dependences for a single-layer and a two-layer reflectarray

40 %. Как правило, КИП печатных ОАР равен или превышает 50 %, т. е. КУ и КИП двухслойной антенны все равно остались ниже данных значений. Это можно объяснить значительным выносом облучателя от осевой линии рефлектора (врезка на рис. 3, а) и большим углом отклонения главного лепестка диаграммы направленности (ДН). Следствием выноса облучателя стало неоптимальное амплитудное распределение поля вдоль раскрытия и значительное переливание. При отклонении главного лепестка от нормали также появляются дополнительные потери в КУ.

В качестве промежуточных выводов можно отметить, что переход на двухслойные структуры позволяет значительно улучшить электри-

ческие характеристики печатных отражательных антенных решеток.

Расширение полосы минимизацией фазовой ошибки в рабочем интервале рабочих частот. Для работы в нескольких узких диапазонах частот подходят многочастотные ОАР [16]. В границах элементарной ячейки таких антенн расположены несколько отражательных элементов, работающих в разных диапазонах.

Тем не менее в ряде случаев требуется сплошная полоса рабочих частот. Следовательно, представляет интерес способ расширения полосы рабочих частот антенной решетки (АР) с пространственным питанием, заключающийся в подборе элемента исходя из реализации требуемого фазового распределения с минимально возможной ошибкой на каждой частоте в рабочем интервале.

При работе на фиксированной частоте для формирования ДН карандашного типа можно получить сколь угодно много распределений фаз вдоль раскрытия, которые будут различаться только начальными значениями опорного поля. При этом, хотя их характеристики будут несколько отличаться друг от друга, увеличение относительной полосы рабочих частот по уровню -3 дБ от максимального значения КУ может составить всего несколько процентов.

Для работы в определенной полосе частот отражательные элементы должны быть способны компенсировать дисперсию фазы поля облучателя. Этого можно добиться, если фазочастотные свойства отражательного элемента подобны (насколько это возможно) линии временной задержки. Чем ближе элемент расположен к центру, тем длиннее эквивалентная линия задержки. Для того чтобы добиться таких свойств, у элемента должно быть несколько степеней свободы регулировки фазы (как минимум, две – одна для регулировки собственно фазы, а другая – для регулировки дисперсии). В таком случае частотные свойства печатного рефлектора будут приближаться к свойствам параболического. Это обстоятельство связывает между собой начальные значения распределений фаз на выбранных частотах. Исходя из этого, алгоритм синтеза геометрии ОАР с расширенной полосой рабочих частот заключается в следующем [17, 18]:

– на нескольких частотах из рабочего диапазона рассчитывается фазовое распределение поля облучателя в раскрыве;

– для каждого элемента ОАР подбираются оптимальные геометрические параметры так, чтобы фаза рассеянного им поля соответствовала минимальной суммарной фазовой ошибке. Фазовая ошибка на конкретной частоте рассчитывается как сумма фазы поля облучателя в месте положения рассматриваемого элемента и значения фазы отраженного поля от элемента в пределах ячейки Флоке, соответствующего выбранным геометрическим параметрам элемента. Суммарная фазовая ошибка вычисляется как сумма модулей фазовых ошибок на каждой из выбранных частот.

В общем виде целевую функцию для такого алгоритма можно записать следующим образом:

$$\varphi_{\Sigma} = \sum_m \sum_n \left(\sum_i \left| \arg \left[S_{11}(x_m, y_n, f_i) \right] \right| + \left| \varphi_{\text{обл}}(x_m, y_n, f_i) - \varphi_0 \right| \right) \rightarrow \min,$$

где S_{11} – коэффициент отражения от элемента в пределах ячейки Флоке; (x_m, y_n) – координаты места положения элемента; $\varphi_{\text{обл}}(x_m, y_n, f_i)$ – значение фазы поля облучателя в точке (x_m, y_n) ; f_i – значение частоты, на которой проводится оптимизация; i – определяется количеством частот, на которых производится оптимизация; φ_0 – постоянная, значение которой подлежит оптимизации наряду с геометрическими параметрами отражательных элементов, соответствующая фазе опорного поля (источника поля). Проанализируем эффективность данного оптимизационного алгоритма на примере двух макетов ОАР. Первый из них построен на основе однослойного щелевого гантельного крестообразного элемента (рис. 4). В данном случае регулировка фазы отраженного поля в пределах элементарной ячейки осуществлялась за счет радиуса наворачия крестообразного элемента R и ширины щели T , период гексагональной решетки составил $a = 0.62\lambda$, расстояние до проводящего экрана $d = 0.7\lambda$, длина щели (расстояние между наворачиями крестообразных элементов) $L_d = 0.4\lambda$ при $\lambda = 14.28$ мм. Оптимизация проводилась в по-

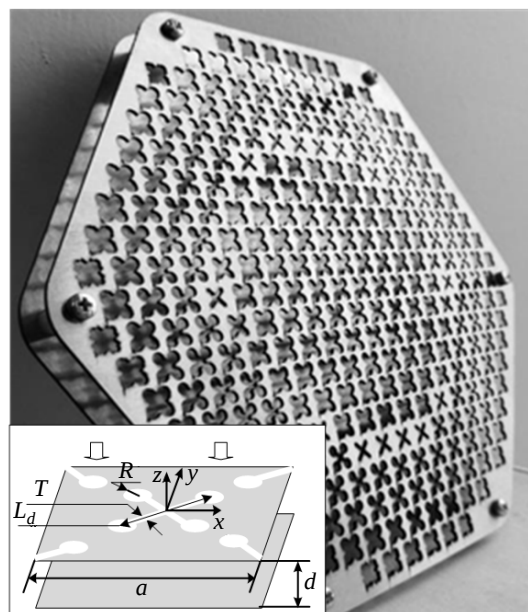


Рис. 4. Щелевая цельнометаллическая ОАР на основе гантельного крестообразного элемента

Fig. 4. Slotted all-metal reflectarray based on a dumbbell cross-shaped element

лосе частот 19...23 ГГц, вид синтезированной и изготовленной структуры показан на рис. 4.

Для анализа эффективности FI-методом также было проведено численное моделирование еще ряда ОАР с центральной рабочей частотой 22 ГГц. При этом регулировка фазы отраженного поля в пределах ячейки осуществлялась только за счет изменения R при фиксированных T . Соответствующие частотные зависимости КУ в сравнении с также численно полученной кривой для оптимизированной ОАР (прочие параметры ячейки Флоке, а также фаза опорного поля от источника приняты одинаковыми) представлены на рис. 5, а. Из данных численного моделирования следует возможность расширения относительной полосы рабочих частот по уровню –3 дБ от максимального значения КУ за счет использования оптимизационной процедуры более чем в 2 раза при некотором (около 0.5 дБ) уменьшении максимального значения КУ и схожем уровне боковых лепестков (УБЛ).

Экспериментальное исследование изготовленного макета ОАР по рис. 4 показало высокую степень совпадения измеренных и численных частотных зависимостей КУ и УБЛ (рис. 5, б). Таким образом, для однослойной щелевой ОАР на основе гантельного крестообразного элемента удалось достичь расширения от-

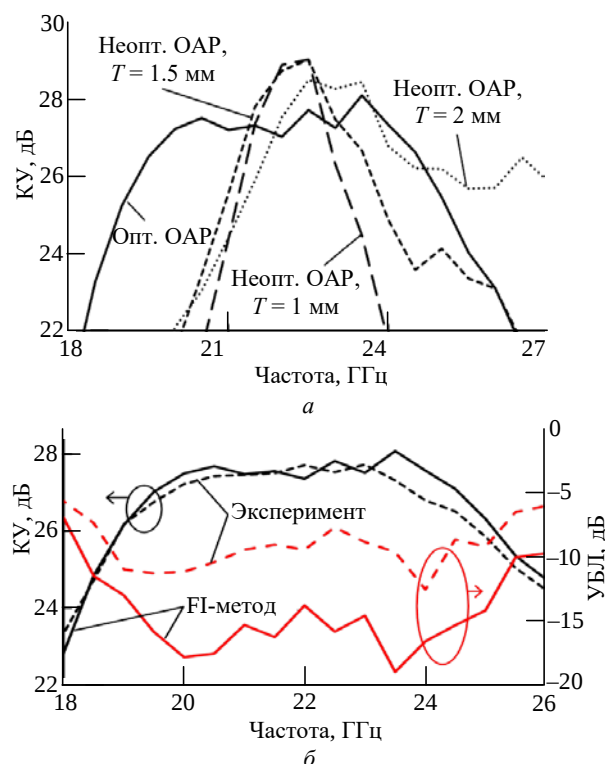


Рис. 5. Для ОАР на основе однослойного щелевого гантелеобразного крестообразного элемента: а – численные частотные зависимости КУ; б – измеренные частотные зависимости КУ и УБЛ

Fig. 5. For a reflectarray based on a single-layer slotted dumbbell cross-shaped element: а – numerical gain frequency dependences; б – measured gain and side lobe level frequency dependences

носительной полосы рабочих частот в 29 % по уровню -3 дБ от максимального значения КУ в 27.6 дБ. Отметим, однако, что в диапазоне рабочих частот измеренный уровень УБЛ оказался выше на ~ 5 дБ, чем для численных данных.

Мультирезонансные элементы для расширения полосы рабочих частот и реализации многодиапазонных ОАР. Использование мультирезонансных элементов позволяет более эффективно применять описанный ранее подход за счет большего количества степеней свободы. Так, например, рассмотрим мультирезонансный элемент, приведенный на рис. 6, а для ОАР диапазона 20...30 ГГц [19]. В качестве базового материала здесь был выбран ламинат Arlon AD 250 с толщиной 0.508 мм. Элемент состоит из трех концентрических колец (врезка на рис. 6, а), где фаза отраженного поля регулируется изменением D (от 2 до 7.2 мм) и w (от 0.15 до 2 мм), причем D определяет фазовый сдвиг элемента, а w – фазовый градиент. Расстояние между печатными кольцами ws при

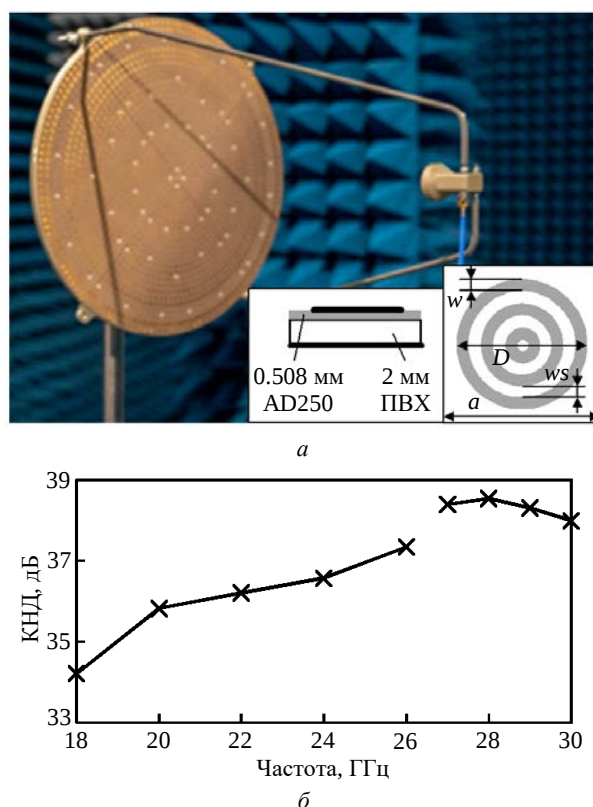


Рис. 6. Для ОАР на основе мультирезонансного элемента: а – вид макета [19]; б – измеренные частотные зависимости КУ [19]

Fig. 6. For a reflectarray based on a multiresonance element: а – prototype [19]; б – measured gain frequency dependences [19]

этом принято равным 0.25 мм, а шаг сетки антенной решетки составляет 7.75 мм.

Макет соответствующей ОАР, выполненный по печатной технологии, приведен на рис. 6, а. В данном случае рефлектор имеет круглую форму, состоит из четырех отдельных сегментов и рассчитан на осевое облучение, $F/D = 1$ ($D = 38\lambda$ на 30 ГГц). Отметим, что при синтезе данной структуры также удалось упростить алгоритм оптимизации, применяя его не ко всему раскрытию, а только лишь к одному сегменту из 24 элементов, расположенных вдоль радиуса рефлектора.

Численные расчеты подтвердили, что даже при аперийном распределении элементов по поверхности рефлектора сохраняется возможность использования характеристик элементарной ячейки, найденных по методике локальной периодичности. Это обусловлено тем, что (за исключением специальных случаев [21]) основные электродинамические воздействия на отдельный элемент оказывают только

близлежащие элементы, а краевыми эффектами можно пренебречь. Как следствие, если сохранять плотность заполнения рефлектора отражающими элементами при переходе от регулярной сетки ОАР к нерегулярной структуре, то для синтеза ОАР можно также использовать характеристики фазы отраженного поля, полученные на основе стандартной процедуры [17].

Измеренные частотные зависимости КНД показаны на рис. 6, б. Разрыв в полученной кривой связан с использованием двух измерительных зондов – одного для диапазона 18...26 ГГц, а другого – для диапазона 26...30 ГГц. Таким образом, измеренное максимальное значение КНД в 38.5 дБ наблюдается на частоте 28 ГГц, а полоса рабочих частот составила 20...30 ГГц, причем с ростом частоты увеличивается и КНД, что свидетельствует о соответствии характеристик данной ОАР традиционным зеркальным антеннам в рабочем диапазоне частот.

Пространственное разнесение частей раскрыва как способ расширения полосы рабочих частот ОАР. Эталонными рефлекторами с точки зрения энергетических характеристик и полосы рабочих частот являются зеркальные антенны (ЗА). В них компенсация фазовых ошибок в раскрыве происходит за счет специальной формы проводящего рефлектора – пространственного разнесения проводника. Отсюда следует еще один возможный способ расширения полосы рабочих частот ОАР – пространственное разнесение элементов ее апертуры.

Два простейших варианта реализации такого подхода иллюстрируются рис. 7, а, б. В первом случае (для осевого облучения) центральная область рефлектора вынесена на определенное дополнительное расстояние от поверхности раскрыва и, как следствие, от источника поля. Это создаст эффект пространственной задержки в центральной зоне фазового распределения на апертуре. Во втором случае производится аппроксимация офсетной ЗА сегментами отражающих поверхностей, синтезированных с помощью стандартной процедуры. На рис. 7, б представлен простейший случай, когда конформная ОАР состоит всего из двух соединенных панелей.

Для случая на рис. 7, а был изготовлен и экспериментально исследован макет ОАР (рис. 8, а), синтезированной на основании эле-

мента по рис. 4. На рис. 8, б приведены экспериментальная и численно полученная (FI-методом) частотные зависимости КУ и УБЛ. Видна высокая степень совпадения результатов.

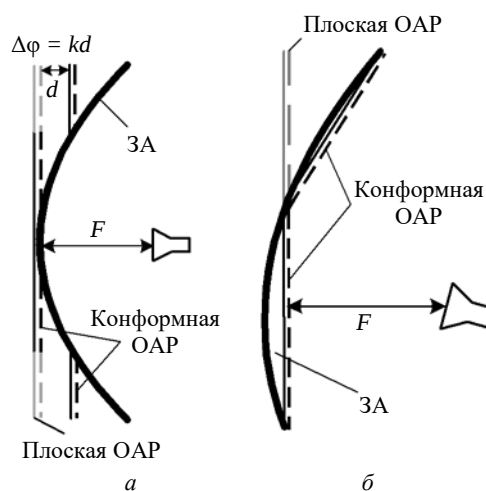


Рис. 7. Схемы построения конформных ОАР: а – ступенчатой; б – угловой

Fig. 7. Schemes of construction for conformal reflectarrays: а – stepwise; б – angular

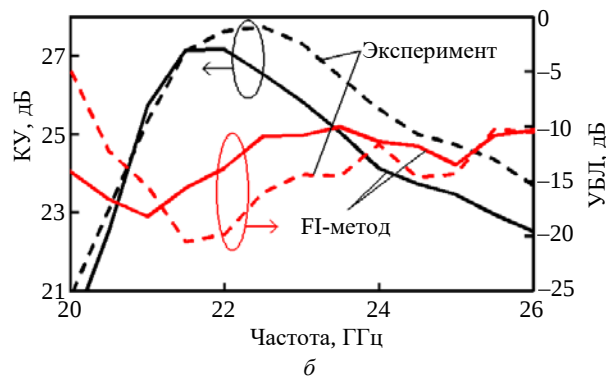
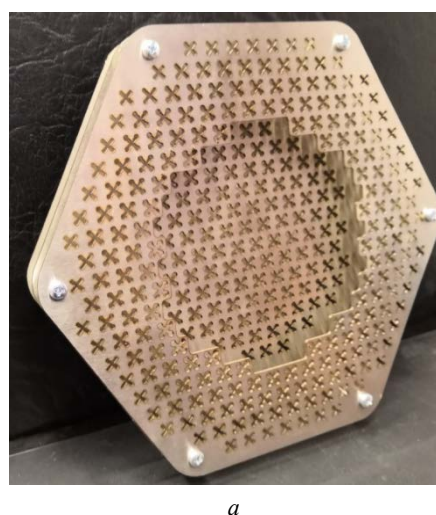


Рис. 8. Для конформной ступенчатой ОАР: а – вид ОАР; б – измеренная и численная частотные зависимости КУ

Fig. 8. For a conformal stepwise reflectarray: а – conformal stepwise reflectarray; б – measured and numerical gain frequency

Это подтверждает эффективность описанного подхода: измеренная относительная полоса рабочих частот по уровню -3 дБ от максимального КУ составила 18 % (что в 2 раза больше численных оценок относительной полосы рабочих частот ОАР на основе аналогичного элемента, но без пространственного разнесения слоев) с максимальным значением КУ в 27.7 дБ (рис. 8, б) при УБЛ не более -10 дБ в пределах полосы рабочих частот.

Вариант реализации конструкции ОАР (см. рис. 7, б) на основе щелевого однослойного квадратного элемента представлен на рис. 9, а. Шаг квадратной сетки решетки принят 0.6λ , расстояние между перфорированным и проводящим слоями – 10 мм, размер апертуры составил $20\lambda \times 20\lambda$. Экспериментальное исследование также проводилось в ЦКП "БЭК"



Рис. 9. Для конформной уголкового ОАР:
 а – вид конформной уголкового ОАР; б – измеренная и численная частотные зависимости КУ

Fig. 9. For a conformal stepwise reflectarray:

а – conformal stepwise reflectarray;
 б – the measured and numerical gain frequency dependences

СПбГЭТУ "ЛЭТИ" с использованием сканера ближнего поля Antest B3-1 и ВАЦ Agilent N5230A PNA-L, измеренные и численно полученные частотные зависимости КНД приведены на рис. 9, б. Из представленных данных видно, что переход к "уголковой" ОАР даже при простейшей аппроксимации параболической антенны двумя фазокорректирующими плоскими поверхностями позволил достичь относительной полосы рабочих частот по уровню -3 дБ от максимального КУ в 21 % с максимальным значением КУ в 30.5 дБ.

Паразитные моды подложки как причина ограничения полосы рабочих частот ОАР. При синтезе щелевых ОАР, особенно на диэлектрических подложках, следует учитывать возможность проявления эффектов, связанных с возбуждением собственных мод рефлектора. Эти моды не распространяются в свободном пространстве вне рефлектора, но при резонансе существенно меняют структуру поля отражательного щелевого элемента, в результате чего снижается КУ антенны. Обычно для их подавления используются токопроводящие межслойные переходы [20, 21], в результате чего происходит усложнение конструкции и соответствующее увеличение стоимости изготовления антенны. Кроме того, такие конструктивные элементы трудно реализовать при изготовлении ОАР не на основе PCB (printed circuit board)-технологии. Поэтому представляет интерес возможность избежать режима возбуждения собственных мод рефлектора за счет выбора геометрии элемента ОАР еще на этапе проектирования. Подробно данный вопрос рассмотрен в [22].

В цельнометаллических щелевых ОАР может возбуждаться стоячая волна между экраном и слоем со щелями при следующих условиях:

$$k_0 d = p\pi \Rightarrow d = p \frac{\lambda}{2}, \quad p = 1, 2, \dots,$$

где k_0 – волновое число в свободном пространстве; d – расстояние от экрана до слоя со щелями. При выполнении указанных условий экран находится от щели на расстоянии, кратном половине длины волны, т. е. щель закорочена экраном. В этом режиме невозможно добиться достаточной для синтеза ОАР перестройки фазы (фактически, регулировка фазы отсутствует),

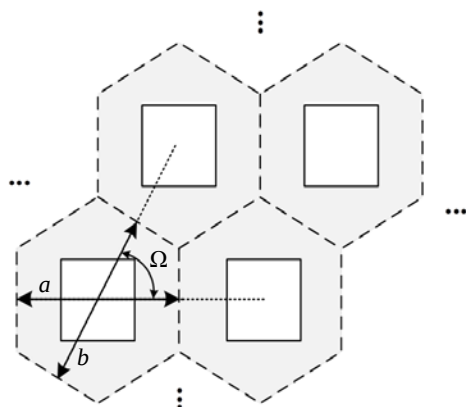


Рис. 10. Вид гексагональной ячейки Флоке
Fig. 10. Hexagonal Floquet cell

что, в свою очередь, приводит к неработоспособности антенны, проявляющейся в провалах на частотной зависимости КУ.

Например, для щелевого прямоугольного элемента при прямоугольной сетке разбиения $a = b = 0.6\lambda$ (рис. 10) и для трех различных расстояний до проводящего экрана $d = 5.5, 6, 6.5$ мм условие выполняется на частотах 27.25, 24.98 и 23.06 ГГц соответственно. Экспериментальные зависимости КНД щелевых ОАР с указанными параметрами представлены на рис. 11. Видно, что спад в частотных зависимостях КНД наблюдается в области указанных частот, являющихся ограничением сверху на полосу рабочих частот рассматриваемых ОАР.

Собственные моды рефлектора могут представлять собой моды плоскопараллельного волновода, образованного экраном и металлическим листом со щелями. Условия возбужде-

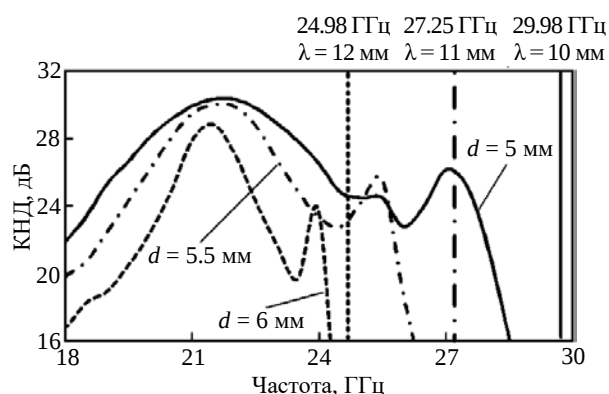


Рис. 11. Численные частотные зависимости КНД для различных расстояний до проводящего экрана

Fig. 11. Directivity numerical frequency dependences for different distances between the layers of the reflectarray

ния таких мод рефлектора можно получить из математической модели, основанной на разложении поля отражательного элемента в ряд по ТЕ- и ТМ-гармоникам. В наибольшей степени обсуждаемый эффект проявляется для прямофокусных ОАР, когда моды плоскопараллельного волновода возбуждаются при определенном расстоянии между элементами:

$$a = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_s} \sin \Omega}, \quad (1)$$

где a – межэлементное расстояние; λ – длина волны в свободном пространстве; Ω – угол между осями сетки, в узлах которой расположены элементы (90° – прямоугольная сетка; 60° – гексагональная сетка); ϵ_s – относительная диэлектрическая проницаемость подложки.

Пример возбуждения моды плоскопараллельного волновода в рефлекторе ОАР на основе композитной панели приводится в [23]. Из (1) видно, что при одинаковом расстоянии a частота резонанса собственной моды рефлектора выше при использовании гексагональной сетки. Таким образом, переходя с прямоугольной сетки на гексагональную можно вынести частоту возбуждения плоскопараллельной моды за пределы рабочего диапазона частот. Такая возможность подтверждается теоретическими и экспериментальными исследованиями щелевых ОАР (рис. 12). Частотные зависимости КУ этих антенн показаны на рис. 13. Хорошо виден провал КУ у ОАР с прямоугольной сеткой. При том же расстоянии между элементами у ОАР с треугольной сеткой провалов в КУ не наблюдается. Дальнейшие исследова-

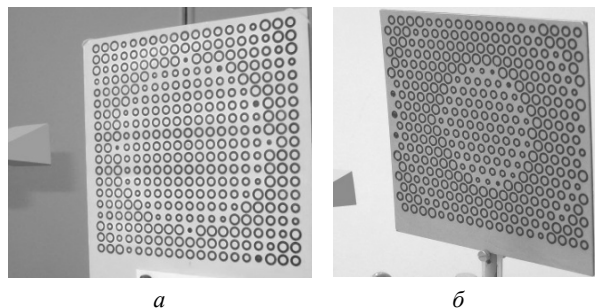


Рис. 12. Щелевые ОАР, изготовленные из композитной панели [23]: а – прямоугольная сетка элементов; б – треугольная сетка элементов

Fig. 12. Slotted reflectarrays made of composite panel [23]: а – rectangular elements grid; б – triangular elements grid

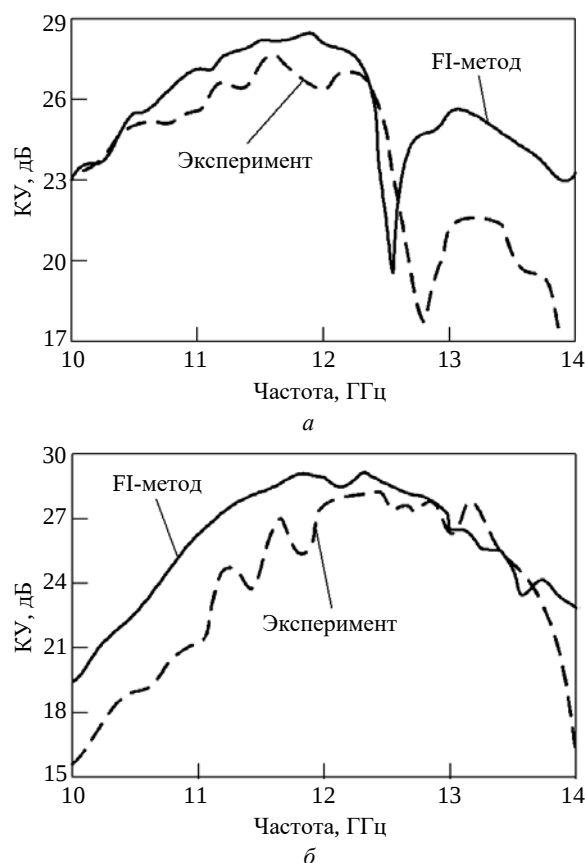


Рис. 13. Измеренные и численные частотные зависимости КУ ОАР [23]: *а* – с прямоугольной сеткой элементов; *б* – с треугольной сеткой элементов

Fig. 13. Measured and numerical gain frequency dependences for reflectarrays [23] with: *a* – rectangular elements grid; *б* – triangular elements grid

ния показали перспективность использования нерегулярной элементной сетки для щелевых ОАР. Образец такой ОАР показан на рис. 14, *а*. Элементы расположены вдоль окружностей, расстояние между окружностями разное и зависит от размера щелей. На рис. 14, *б* приводится экспериментальная зависимость КНД от частоты. Ее форма типична для однослойных ОАР без провалов.

Заключение. В статье рассмотрены некоторые подходы, позволяющие расширить полосу рабочих частот ОАР диапазона СВЧ. Представлен обзор как ранее опубликованных авторами данных экспериментальных исследований, так и ряд новых рабочих материалов, включая последние результаты исследования щелевых ОАР на основе фрезерованных композитных панелей с неэквидистантным расположением элементов. Показано, что использование многослойных структур, оптимизация геометрии элементов

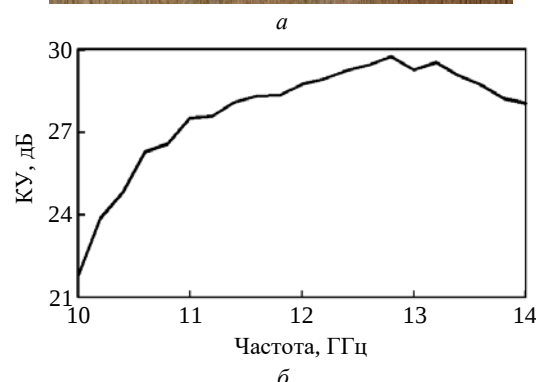
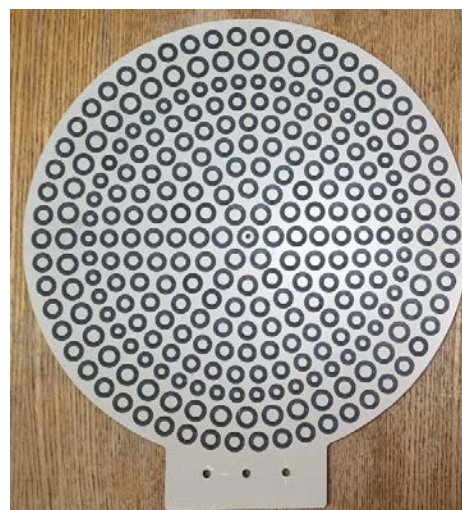


Рис. 14. Для щелевой ОАР, изготовленной из композитной панели с неэквидистантным расположением элементов: *а* – макет; *б* – измеренная частотная зависимость КУ

Fig. 14. For slotted reflectarray made of a composite panel with a non-equidistant arrangement of elements: *a* – prototype; *б* – the measured gain frequency dependence

(например, гантельных крестообразных структур) и пространственное разнесение слоев позволяют значительно увеличить относительную полосу частот – до 40 % для печатных ОАР и 30 % для цельнометаллических конструкций. Алгоритмы минимизации фазовых ошибок, основанные на многочастотном синтезе, показали свою практическую ценность, обеспечивая устойчивость характеристик в широком диапазоне. При этом ключевыми ограничениями остаются сложность проектирования многослойных систем и риск возбуждения паразитных мод, требующих учета на этапе проектирования.

Результаты исследований непосредственно используются в разработке антенн для современных телекоммуникационных систем, включая сети 5G/6G и спутниковую связь, где требуются широкополосные и компактные решения. Развитие аддитивных технологий и внед-

рение автоматизированных методов проектирования открывают новые возможности для создания сложных конформных и гибридных структур. Дальнейшие исследования могут быть направлены на снижение вычислительной сложности алгоритмов, улучшение устойчиво-

сти к экстремальным условиям и миниатюризацию элементов без потери эффективности. Рассмотренные подходы формируют основу для следующего поколения антенных систем, отвечающих растущим требованиям к скорости и надежности передачи данных.

Авторский вклад

Любина Любовь Михайловна – анализ характеристик цельнометаллических ОАР; анализ условий возникновения паразитной моды в цельнометаллических ОАР.

Балландович Святослав Владимирович – анализ характеристик и разработка конструкций печатных ОАР; анализ условий возникновения паразитной моды ОАР с диэлектрическим межслойным заполнением.

Костиков Григорий Александрович – организация и проведение измерений характеристик разработанных макетов ОАР.

Антонов Юрий Геннадьевич – разработка конструкций макетов ОАР; анализ влияния элементов конструкции на характеристики разработанных ОАР.

Author's contribution

Liubov M. Liubina, analysis of the characteristics of full-metal reflectarrays; analysis of the conditions for the occurrence of a parasitic mode of full-metal reflectarrays.

Svyatoslav V. Ballandovich, analysis of the characteristics of PCB reflectarrays; analysis of the conditions for the occurrence of a parasitic mode of PCB reflectarrays.

Grigory A. Kostikov, organization of measurement of the developed UAR reflectarrays.

Yuriy G. Antonov, development of reflectarrays designs; analysis of the influence of structural elements on the characteristics of the developed reflectarrays.

Список литературы

1. Olwal T. O., Chuku P. N., Lysko A. A. Antenna Research Directions for 6G: A brief overview through sampling literature // 7th Intern. Conf. on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS), Coimbatore, India, 19–20 March 2021. IEEE, 2021. P. 1582–1587. doi: 10.1109/ICACCS51430.2021.9441781

2. High Gain Elliptic Lens Antenna at D-Band for 6G Multi Gbps Data Transmission / S. Chakrabarti, V. K. Singh, A. Kumar, K. G. Thomas, P. H. Rao // IEEE Intern. Symp. on Antennas and Propagation and INC/USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/INC-USNC-URSI), Firenze, Italy, 14–19 July 2024. IEEE, 2024. P. 887–888. doi: 10.1109/AP-S/INC-USNC-URSI52054.2024.10686215

3. A Review of Wideband Reflectarray Antennas for 5G Communication Systems / M. H. Dahri, M. H. Jamaluddin, M. I. Abbasi, M. R. Kamarudin // IEEE Access. 2017. Vol. 5. P. 17803–17815. doi: 10.1109/ACCESS.2017.2747844

4. Опыт разработки антенных решеток с квазиоптическим типом питания / С. В. Поленга, Р. О. Рязанцев, Ю. П. Саломатов, В. С. Панько, М. И. Сугак // Журн. СФУ. Техника и технологии. 2011. Т. 4, № 1. С. 40–50.

5. Balanis C. A. Antenna Theory: Analysis and Design. New Jersey: John Wiley & Sons, 2016. 1104 p.

6. Elliott R. S. Antenna Theory and Design. New Jersey: John Wiley & Sons, 2003. 625 p.

7. Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws of Reflection and Refraction / N. Yu, P. Genevet, M. A. Kats, F. Aieta, J.-P. Tetienne, F. Capasso,

Z. Gaburro // Science. 2011. Vol. 334. P. 333–337. doi: 10.1126/science.1210713

8. Millimeter-wave waveguide reflectarray / S. V. Polenga, A. V. Stankovsky, R. M. Krylov, A. D. Nemshon, Yu. A. Litinskaya, Yu. P. Salomатов // Intern. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON), Omsk, Russia, 21–23 May 2015. IEEE, 2015. P. 1–4. doi: 10.1109/SIBCON.2015.7147335

9. An integrated 2-bit metasurface array antenna with broadband lowradar cross-section covering large incident angle space / Zh. Zhang, T. Liu, X. Cao, H. Yang, L. Jidi, Ju. Gao // IET Microwaves, Antennas & Propagation. 2022. Vol. 16, № 6. P. 367–377. doi: 10.1049/mia2.12251

10. Emerging Metallic Systems for Additive Manufacturing: In-Situ Alloying and Multi-Metal Processing in Laser Powder Bed Fusion / S. L. Sing, S. Huang, G. D. Goh, G. L. Goh, C. F. Tey, J. H. K. Tan, W. Y. Yeong // Progress in Materials Science. 2021. Vol. 119. Art. № 100795. doi: 10.1016/J.PMATSCI.2021.100795

11. Synthesis of Mask-Constrained Pattern-Reconfigurable Nonuniformly Spaced Linear Arrays Using Artificial Neural Networks / C. Cui, W. T. Li, X. T. Ye, Y. Q. Hei, P. Rocca, X. W. Shi // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2022. Vol. 70, № 6. P. 4355–4368. doi: 10.1109/TAP.2022.3140214

12. A Novel Metasurface Inverse Design Based on Back Propagation Neural Network / T. Qin, S. Wen, X. Q. Lin, Y. Cao, Y. Cai, P. Mei // 18th European Conf.

on Antennas and Propagation (EuCAP), Glasgow, United Kingdom, 17–22 March 2024. IEEE, 2024. P. 1–5.
doi: 10.23919/EuCAP60739.2024.10501758

13. Обуховец В. А., Касьянов А. О. Микрополосковые отражательные антенные решетки. Методы проектирования и численное моделирование. М.: Радиотехника, 2006. 240 с.

14. Advanced Metasurface-Based Antennas: A Review / W. Yang, J. Li, D. Chen, Y. Cao, Q. Xue, W. Che // IEEE Open J. of Antennas and Propagation. 2025. Vol. 6, № 1. P. 6–24.
doi: 10.1109/OJAP.2024.3465513

15. Single-Layer Four-Band, Dual Linear Polarization Reflective Metasurface / X. Kai, F. Li, J. Feng, S. Xu // 6th Intern. Conf. on Information Communication and Signal Processing (ICICSP), Xi'an, China, 23–25 Sept. 2023. IEEE, 2023. P. 805–809.
doi: 10.1109/ICICSP59554.2023.10390627

16. Балландович С. В. Проектирование двухчастотных печатных отражательных антенных решеток с помощью модифицированной ячейки Флоке // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2015. № 1. С. 17–20.

17. Chaharmir M. R., Shaker J., Legay H. Broad-band design of a single layer large reflectarray using multi cross loop elements // IEEE Trans. Antennas Propag. 2009. Vol. 57, № 10. P. 3363–3366.
doi: 10.1109/TAP.2009.2029600

18. Increasing bandwidth of full-metal slot reflectarray antennas / M. I. Sugak, S. V. Ballandovich, G. A. Kostikov, L. M. Liubina, Y. G. Antonov // ITM Web Conf. 2019. Vol. 30. Art. № 05023.

doi: 10.1051/itmconf/20193005023

19. MM-Band Reflectarray with Extended Bandwidth / S. V. Ballandovich, L. M. Liubina, G. A. Kostikov, Yu. G. Antonov // Seminar on Fields, Waves, Photonics and Electro-optics: Theory and Practical Applications (FWPE), Saint Petersburg, Russia, 21 Nov. 2023. IEEE, 2023. P. 4–7.
doi: 10.1109/FWPE60445.2023.10368549

20. Design and Analysis of a Reflectarray Using Slot Antenna Elements for Ka-band SatCom / Qi Luo, S. Gao, Ch. Zhang, D. Zhou, T. Chaloun, W. Menzel // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2015. Vol. 63, № 4. P. 1365–1374.
doi: 10.1109/TAP.2015.2401393

21. Bhattacharyya A., Fordham O., Liu Ya. Analysis of stripline-fed slot-coupled patch antennas with vias for parallel-plate mode suppression // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1998. Vol. 46, № 4. P. 538–545.
doi: 10.1109/8.664118

22. Parallel-Plate Modes in Slot Reflectarray Antennas / S. V. Ballandovich, M. I. Sugak, G. A. Kostikov, L. M. Liubina, Yu. G. Antonov // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2021. Vol. 69, № 6. P. 3303–3311.
doi: 10.1109/TAP.2020.3048501.

23. Характеристики плоских отражательных антенных решеток, выполненных на основе фрезерованных композитных панелей / Ю. Г. Антонов, С. В. Балландович, Г. А. Костиков, М. И. Сугак // Антенны. 2010. № 10 (161). С. 5–10.

Информация об авторах

Любина Любовь Михайловна – кандидат технических наук (2020), доцент кафедры теоретических основ радиотехники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 30 научных работ. Сфера научных интересов – электродинамика и антенно-фидерные устройства.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: lmlyubina@etu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1366-3316>

Балландович Святослав Владимирович – кандидат технических наук (2015), доцент (2021), доцент кафедры теоретических основ радиотехники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 30 научных работ. Сфера научных интересов – электродинамика и антенно-фидерные устройства.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: svballandovich@etu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3208-6606>

Костиков Григорий Александрович – кандидат технических наук (2007), доцент (2014), доцент кафедры теоретических основ радиотехники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 40 научных работ. Сфера научных интересов – электродинамика и антенно-фидерные устройства.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: gakostikov@etu.ru
<https://orcid.org/0009-0008-2929-3712>

Антонов Юрий Геннадьевич – кандидат технических наук (2007), доцент (2012), доцент кафедры теоретических основ радиотехники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университе-

та "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 40 научных работ. Сфера научных интересов – электродинамика и антенно-фидерные устройства.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: igantonov@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6816-3418>

References

1. Olwal T. O., Chuku P. N., Lysko A. A. Antenna Research Directions for 6G: A Brief Overview through Sampling Literature. 7th Intern. Conf. on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS), Coimbatore, India, 19–20 March 2021. IEEE, 2021, pp. 1582–1587. doi: 10.1109/ICACCS51430.2021.9441781
2. Chakrabarti S., Singh V. K., Kumar A., Thomas K. G., Rao P. H. High Gain Elliptic Lens Antenna at D-Band for 6G Multi Gbps Data Transmission. IEEE Intern. Symp. on Antennas and Propagation and INC/USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/INC-USNC-URSI), Firenze, Italy, 14–19 July 2024. IEEE, 2024, pp. 887–888. doi: 10.1109/AP-S/INC-USNC-URSI52054.2024.10686215
3. Dahri M. H., Jamaluddin M. H., Abbasi M. I., Kamarudin M. R. A Review of Wideband Reflectarray Antennas for 5G Communication Systems. IEEE Access. 2017, vol. 5, pp. 17803–17815. doi: 10.1109/ACCESS.2017.2747844
4. Polenga S. V., Ryazantsev R. O., Salomatov Yu. P., Panko V. S., Sugak M. I. Reflectarray and Transmitarray Development Experience. J. of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2011, vol. 4, no. 1, pp. 40–50. (In Russ.)
5. Balanis C. A. Antenna Theory: Analysis and Design. New Jersey, John Wiley & Sons, 2016, 1104 p.
6. Elliott R. S. Antenna Theory and Design. New Jersey, John Wiley & Sons, 2003, 625 p.
7. Yu N., Genevet P., Kats M. A., Aieta F., Tetienne J.-P., Capasso F., Gaburro Z. Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws of Reflection and Refraction. Science. 2011, vol. 334, pp. 333–337. doi: 10.1126/science.1210713
8. Polenga S. V., Stankovsky A. V., Krylov R. M., Nemshon A. D., Litinskaya Yu. A., Salomatov Yu. P. Millimeter-Wave Waveguide Reflectarray. Intern. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON), Omsk, Russia, 21–23 May 2015. IEEE, 2015, pp. 1–4. doi: 10.1109/SIBCON.2015.7147335
9. Zhang Zh., Liu T., Cao X., Yang H., Jidi L., Gao Ju. An Integrated 2-Bit Metasurface Array Antenna with Broadband Lowradar Cross-Section Covering Large Incident Angle Space. IET Microwaves, Antennas & Propagation. 2022, vol. 16, no. 6, pp. 367–377. doi: 10.1049/mia2.12251
10. Sing S. L., Huang S., Goh G. D., Goh G. L., Tey C. F., Tan J. H. K., Yeong W. Y. Emerging Metallic Systems for Additive Manufacturing: In-Situ Alloying and Multi-Metal Processing in Laser Powder Bed Fusion. Progress in Materials Science. 2021, vol. 119, art. no. 100795. doi: 10.1016/J.PMATSCI.2021.100795
11. Cui C., Li W. T., Ye X. T., Hei Y. Q., Rocca P., Shi X. W. Synthesis of Mask-Constrained Pattern-Reconfigurable Nonuniformly Spaced Linear Arrays Using Artificial Neural Networks. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2022, vol. 70, no. 6, pp. 4355–4368. doi: 10.1109/TAP.2022.3140214
12. Qin T., Wen S., Lin X. Q., Cao Y., Cai Y., Mei P. A Novel Metasurface Inverse Design Based on Back Propagation Neural Network. 18th European Conf. on Antennas and Propagation (EuCAP), Glasgow, United Kingdom, 17–22 March 2024. IEEE, 2024, pp. 1–5. doi: 10.23919/EuCAP60739.2024.10501758
13. Obukhovets V. A., Kasyanov A. O. *Mikropoloskovye otrazhatel'nye antennoye reshetki. Metody proektirovaniya i chislennoe modelirovaniye* [Microstrip Reflective Antenna Arrays. Design Methods and Numerical Modeling]. Moscow, Radiotekhnika, 2006, 240 p. (In Russ.)
14. Yang W., Li J., Chen D., Cao Y., Xue Q., Che W. Advanced Metasurface-Based Antennas: A Review. IEEE Open J. of Antennas and Propagation. 2025, vol. 6, no. 1, pp. 6–24. doi: 10.1109/OJAP.2024.3465513
15. Kai X., Li F., Feng J., Xu S. Single-Layer Four-Band, Dual Linear Polarization Reflective Metasurface. 6th Intern. Conf. on Information Communication and Signal Processing (ICICSP), Xi'an, China, 23–25 Sept. 2023. IEEE, 2023, pp. 805–809. doi: 10.1109/ICICSP59554.2023.10390627
16. Ballandovich S. V. Designing Dual-Frequency Printed Reflective Antenna Arrays Using a Modified Floquet Cell. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2015, no. 1, pp. 17–20. (In Russ.)
17. Chaharmir M. R., Shaker J., Legay H. Broadband Design of a Single Layer Large Reflectarray Using Multi Cross Loop Elements. IEEE Trans. Antennas Propag. 2009, vol. 57, no. 10, pp. 3363–3366. doi: 10.1109/TAP.2009.2029600
18. Sugak M. I., Ballandovich S. V., Kostikov G. A., Liubina L. M., Antonov Yu. G. Increasing Bandwidth of Full-Metal Slot Reflectarray Antennas. ITM Web Conf. 2019, vol. 30, art. no. 05023. doi: 10.1051/itmconf/20193005023
19. Ballandovich S. V., Liubina L. M., Kostikov G. A., Antonov Yu. G. MM-Band Reflectarray with Extended Bandwidth. Seminar on Fields, Waves, Photonics and Electro-optics: Theory and Practical Applications (FWPE), Saint Petersburg, Russia, 21 Nov. 2023. IEEE, 2023, pp. 4–7. doi: 10.1109/FWPE60445.2023.10368549

20. Luo Qi, Gao S., Zhang Ch., Zhou D., Chaloun T., Menzel W. Design and Analysis of a Reflectarray Using Slot Antenna Elements for Ka-band SatCom. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2015, vol. 63, no. 4, pp. 1365–1374.
doi: 10.1109/TAP.2015.2401393

21. Bhattacharyya A., Fordham O., Liu Ya. Analysis of Stripline-Fed Slot-Coupled Patch Antennas with Vias for Parallel-Plate Mode Suppression. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1998, vol. 46, no. 4, pp. 538–545.

doi: 10.1109/8.664118

22. Ballandovich S. V., Sugak M. I., Kostikov G. A., Liubina L. M., Antonov Yu. G. Parallel-Plate Modes in Slot Reflectarray Antennas. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2021, vol. 69, no. 6, pp. 3303–3311.

23. Antonov Yu. G., Ballandovich S. V., Kostikov G. A., Sugak M. I. Characteristics of Planar Reflectarrays Designed by a Method of Composite Panel Milling. Antennas. 2010, no. 10 (161), pp. 5–10. (In Russ.)

Information about the authors

Liubov M. Liubina, Cand. Sci. (Eng.) (2020), Associate Professor of the Department of Theoretical Fundamentals of Radio Engineering of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 30 scientific publications. Area of expertise: electrodynamics and antenna-feeder devices.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: lmlyubina@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1366-3316>

Svyatoslav V. Ballandovich, Cand. Sci. (Eng.) (2015), Associate Professor (2021), Associate of the Department of Theoretical Fundamentals of Radio Engineering of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 30 scientific publications. Area of expertise: electrodynamics and antenna-feeder devices.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: svballandovich@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3208-6606>

Grigory A. Kostikov, Cand. Sci. (Eng.) (2007), Associate Professor (2014), Associate Professor of the Department of Theoretical Fundamentals of Radio Engineering of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 40 scientific publications. Area of expertise: electrodynamics and antenna-feeder devices.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: gakostikov@etu.ru

<https://orcid.org/0009-0008-2929-3712>

Yuriy G. Antonov, Cand. Sci. (Eng.) (2007), Associate Professor (2012), Associate Professor of the Department of Theoretical Fundamentals of Radio Engineering of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 40 scientific publications. Area of expertise: electrodynamics and antenna-feeder devices.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: igantonov@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6816-3418>
